سال سی و چهارم، شمارهٔ یک، ۱۴۰۰
DOI: 10.22067/jfcei.2021.61760.0

بررسی تغییرشکل وابسته به زمان در ماسه‌های خشک*

مقاله پژوهشی

مسعود نصیری[۱] محمد حاجی‌عزیزی[۲] احمدرضا مظاهری[۳] پنکاسم جانپرادیست[٤]

چکیده *رفتار ماسه‌ها وابسته به زمان است و می‌تواند پایداری بسیاری از پروژه‌های ژئوتکنیکی را تحت تأثیر خود قرار دهد. در این پژوهش از ۹ مدل ماسه با شکل و اندازه‌ی ذرات مختلف و دانه‌بندی متفاوت به‌منظور بررسی رفتار وابسته به زمان ماسه‌ها در بازه‌های زمانی ۲، ۷ و ۳۰ روزه و تحت بارگذاری‌های مختلف استفاده شده‌است. نمونه‌ها با تراکم ٦۰ درصد، به‌مدت ۳۰ روز تحت تنش ٤۵ کیلوپاسکال و در بازه‌های ۷ روزه تحت تنش‌های ۲٦ تا ٤۱٦ کیلوپاسکال (با گام‌های افزایشی دو برابر) تحت آزمایش ادئومتر در حالت خشک قرار گرفتند. نتایج نشان داد که چرخش، لغزش و خردشدگی دانه‌های ماسه روی هم در بازه‌های زمانی آزمایش‌شده تحت بارهای ثابت، عامل ایجاد تغییرشکل‌های خزشی در نمونه‌ها بوده‌است. نمونه‌های ماسه‌ای بین ۱/۵ تا ٤/۲ درصد کرنش خزشی در بازه‌ی زمانی ۳۰ روزه و بین ۰/٦۱ تا ۲/۵ درصد کرنش خزشی در بازه‌های زمانی ۷ روزه از خود نشان دادند. هم‌چنین روابط خطی به‌منظور پیش‌بینی تغییرشکل وابسته به زمان ماسه‌ها پیشنهاد شد. نتایج به‌دست‌آمده تطابق خوبی با مطالعات قبلی داشتند.*

واژه‌های کلیدی ماسه‌ی خشک، آزمایش ادئومتری، رفتار وابسته به زمان، اندازه‌ی ذرات.

Study of Time-Dependent Deformations in Dry Sands

M. Nasiri M. Hajiazizi A. R. Mazaheri P. Jongpradist

Abstract *The time-dependent behavior of sands is one of the main issues that can influence many projects. In this study nine sand models with different particles shape and sizes and different grain distribution have been used to investigate creep behavior. The samples were prepared at 60% relative density and the constant stresses of 45 kPa for 30 days and 26 to 416 kPa for seven days (with the double increase in stress increment) under dry conditions in the Oedometer apparatus (one-dimensional consolidation) were tested. The results showed that the rotation, slipping, and crushing of the sand grains over time under constant load was the cause of creep deformation in the dry samples. Sand samples exhibit 1.5 to 4.2% creep strains in 30 days, and 0.61 to 2.5% creep strains in seven days' time interval. Finally, two linear equations are presented to predict the deformation of sands over time. The results were in good agreement with previous studies.*

Key Word Dry Sand, Creep, Oedometer Test, Time-Dependent Behavior, Particle size.

*تاریخ دریافت مقاله۱۳۹۹/۸/۸ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/۲/۱۸ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری مهندسی عمران – ژئوتکنیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
(۲) نویسنده مسئول: دانشیار مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. Email: mhazizi@razi.ac.ir
(۳) استادیار مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آیت الله بروجردی، بروجرد، ایران.
(٤) دانشیار مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی کینگ مونگ‌کوت، تونبوری، تایلند.

مقدمه

اعمال بار به خاک منجر به ایجاد تغییر شکل در توده‌ی خاک می‌شود. تغییرشکل‌ها بلافاصله پس از اعمال بار پایان نمی‌یابند، بلکه با گذشت زمان و به‌تدریج افزایش خواهند یافت که به این پدیده خزش در خاک گفته می‌شود. به‌عبارت دیگر، خزش یعنی تغییر شکل خاک در تنش ثابت و با گذشت زمان [1]. تمامی خاک‌ها دچار خزش می‌شوند، اما مقدار خزش به نوع خاک، دمای محیط، مدت زمان و شکل ذرات بستگی دارد. رس نرم تغییرشکل‌های وابسته به زمان بیشتری را در چند دقیقه یا چند ساعت از خود نشان می‌دهد، درحالی‌که برای ماسه‌ها ممکن است چندین روز طول بکشد تا تغییرشکل‌های خزشی از خود نشان دهند [2]. همین موضوع یکی از عللی است که تاکنون بیشتر تحقیقات انجام‌شده به بررسی رفتار خزشی رس‌ها معطوف بوده‌است و پژوهش‌های کمتری رفتار خزشی ماسه‌ها را مورد مطالعه قرار داده‌اند. عمده‌ی پژوهش‌های انجام‌شده درزمینه‌ی خزش ماسه‌ها به‌کمک آزمایش‌های سه‌محوری و ادئومتر بوده‌است. ماسه‌ی اشباع، تغییرشکل خزشی قابل توجهی را از خود نشان می‌دهد و کرنش خزشی می‌تواند بین ۷ تا ۲۲ درصد افزایش یابد [2]. موریایاما و همکاران [3] در آزمایش سه‌محوری زهکشی‌شده نشان دادند که زمان گسیختگی ناشی از خزش در ماسه‌ها، با محاسبه‌ی مقدار نرخ کرنش خزشی قابل پیش‌بینی است. براساس تعریف موریایاما [4] مقاومت گسیختگی عبارت است از تنش بحرانی که کمتر از آن هیچ گسیختگی خزشی رخ ندهد. این مقاومت از بسیج ذرات در ماسه‌ها و رس‌ها به‌وجود می‌آید. لاد و لیو [5] به‌کمک آزمایش سه‌محوری رفتار خزشی ماسه‌ها را بررسی کردند. آنان در پژوهش خود تنش همه‌جانبه، بار محوری و دما را ثابت نگه داشتند و تغییرشکل‌های محوری و حجمی را اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که طبیعت کرنش‌های خزشی مشابه کرنش‌های پلاستیک است. میزان خزش با فشار محصورکننده، به‌ویژه در تنش‌های بالا، افزایش پیدا خواهد کرد. این پژوهشگران پس از انجام آزمایش، نمونه‌ی خاک را به‌کمک الک مجددا دانه‌بندی کردند که نتایج نشان داد حدود ۲۰٪ ذرات از الک شماره‌ی ۲۰۰ عبور می‌کنند، درحالی‌که پیش از انجام آزمایش هیچ ذره‌ای دارای قطر کوچک‌تر از ۷۵ میکرون نبوده‌است که نشان از لغزش و خردشدگی ذرات حین خزش داشته‌باشد. ماهیت پیچیده‌ی رفتار خزشی از آنجا مشخص می‌شود که نتایج بسیاری از آزمایش‌های سه‌محوری نشان داده‌است که با افزایش تنش انحرافی، نرخ کرنش انحرافی خاک هم بیشتر می‌شود، درحالی‌که برخی پژوهش‌ها [6] نشان دادند که نرخ کرنش کاهش می‌یابد. این تفاوت رفتار به‌علت تفاوت در کرنش‌های خاک است. پژوهش‌های ونگ و همکاران [7] نشان داد که خردشدن ذرات عامل اصلی خزش در ماسه‌هاست. این خردشدگی در اثر اعمال تنش‌های فشاری رخ خواهد داد. به‌طور کلی دو عامل اصلی برای خزش ماسه‌ها تعریف می‌شود، یکی خردشدگی و شکست ذرات به‌علت تنش‌های تماسی بین دانه‌ای و دیگر، بازآرایش ذرات با گذشت زمان به‌علت لغزش ریزمکانیکی (Micromechanical). تغییر شکل‌های خزشی با افزایش تنش اعمالی بیشتر می‌شوند که علت آن می‌تواند خردشدگی بیشتر ذرات ماسه باشد. بااین‌حال، ذرات خردشده رفته‌رفته پایدارتر خواهند شد و به‌همین دلیل تغییرشکل‌های دراز مدت، کمتر خواهند شد. نیان و همکاران [8] به‌کمک آزمایش برش مستقیم فرایند خزش ماسه‌ها را بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که در تنش برشی پایین، نسبت تخلخل خاک زیاد است و نقاط تماس‌های داخلی ذرات خاک کم است، درنتیجه پدیده‌ی خزش در چنین تنش‌هایی قابل مشاهده نیست. در تراکم نسبی پایین و میزان تنشی که به‌اندازه‌ی کافی زیاد باشد تا توانایی خرد کردن ذرات ماسه را داشته باشد، مقدار خزش قابل توجهی مشاهده می‌شود [9].

یین و همکاران [10] با آزمایش ادئومتر و برش سه‌محوری به بررسی وضعیت پسماند ماسه‌ی ریخته‌گری

پرداختند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که این نوع ماسه هم مانند ماسه‌های طبیعی از خود تراکم ثانویه نشان می‌دهد. نتایج تحقیقات پارک و همکاران [11] نشان داد که رفتار خزشی ماسه‌ها به نسبت تنش و تراکم نسبی اولیه‌ی توده‌ی خاک بستگی دارد. پژوهش‌های یانگ و همکاران [12] نشان داد که خصوصیات خزشی ماسه متأثر از تراز تنش است. تحقیقات برخی از محققان [13] نشان داد که نمونه‌های ماسه‌ای مرطوب، کرنش‌های خزشی بیشتری نسبت به نمونه‌های خشک از خود نشان می‌دهند. پارک و همکاران [14] نشان دادند که رفتار خزشی حجمی انقباضی یا اتساعی با ترکیب ویژه‌ای از نسبت تخلخل و تنش مؤثر متوسط قائم در ابتدای فرایند خزش تعیین می‌شود. نگهدار و همکاران [۱۵] نشان دادند که در آزمایش بارگذاری- باربرداری، زمان لازم برای رسیدن به یک تخلخل مشخص طی خزش، کمتر از آزمایش تک‌مرحله‌ای می‌باشد و این فرایند باعث تسریع در فرایند خزش می‌شود.

تاکنون پژوهش‌های متعددی به‌منظور بررسی رفتار خزشی ماسه‌ها انجام شده‌است که از جمله‌ی آنها می‌توان به آزمایش‌های سه‌محوری [16-22] برش مستقیم [8] و ادئومتر [1,10] و هم‌چنین مدل‌سازی‌های عددی [23,24] اشاره کرد. طبق تعریف تاناکا و تانیماتو [25] سازوکار خزش، جابه‌جایی ذرات ماسه است. وقتی ماسه تحت تنش قرار می‌گیرد، ذرات حرکت می‌کنند. نرخ جابه‌جایی در ابتدا زیاد و با گذشت زمان رفته‌رفته کاهش می‌یابد. مجیا و همکاران [26] روی دو نمونه‌ی ماسه‌ی سست آزمایش ادئومتر با تنش‌های قائم مؤثر مختلف انجام دادند. یافته‌های آنان نشان داد که کرنش‌های خزشی وابسته به زمان مشاهده شده در این آزمایش‌ها به‌علت لغزش و چرخش دانه‌ها بوده‌است و نه به‌علت خردشدگی ذرات (چرا که تراز تنش‌های اعمالی به نمونه‌ها نسبتا پایین بوده‌است). مک دوول [27] سازوکار خزش ماسه را با لغزش بین ذرات و ترک‌خوردگی‌شان شرح داد. در این بین، جای خالی پیش‌بینی تغییرشکل ماسه با گذشت زمان احساس می‌شود که در این پژوهش تغییرشکل‌های وابسته به زمان مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

بررسی رفتار وابسته به زمان ماسه‌ها از جمله موضوعات مهم در مهندسی ژئوتکنیک است که علی‌رغم تحقیقات مختلف انجام‌شده، نیاز به پیش‌بینی تغییرشکل‌های محوری با گذشت زمان در خاک‌های ماسه‌ای خشک احساس می‌شود. در پژوهش حاضر، رفتار خزشی ماسه‌های خشک تحت یک تنش ثابت و به‌مدت ۳۰ روز و هم‌چنین بازه‌ای از تنش‌ها (۲٦ تا ٤١٦ کیلوپاسکال) به‌مدت ۷ روز در آزمایش ادئومتر مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته‌است. پژوهش‌های پیشین به‌کمک آزمایش ادئومتر اغلب رفتار خزشی ماسه‌ها را در گام‌های بارگذاری افزایشی مورد بررسی قرار داده‌اند درحالی‌که تحقیق حاضر رفتار خزشی ماسه‌ها را در یک تنش ثابت طولانی (۳۰ روزه) و علاوه بر آن، چندین تنش در بازه‌های زمانی ۷ روزه، مورد مطالعه قرار داده‌است تا با وضعیت بارگذاری واقعی، سازگاری بیشتری داشته باشد. نتایج به‌دست آمده از این مطالعه نشان می‌دهد که توجه به کرنش‌های خزشی و رفتار زمان‌مند ماسه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است به‌طوری که می‌تواند پایداری پروژه‌های ژئوتکنیکی را تحت تأثیر قرار دهد. در پایان، روابط خطی ساده و با دقت کافی برای تخمین تغییرشکل‌های وابسته به زمان برای این ماسه‌ها پیشنهاد شده‌است.

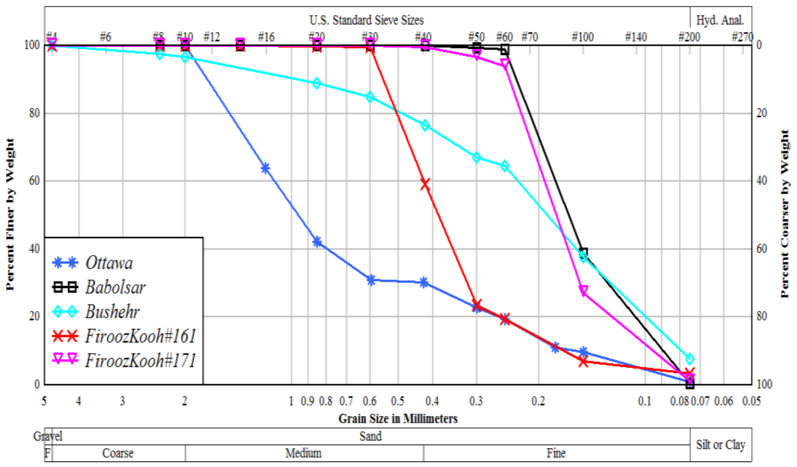
مصالح و روش آزمایش

در این پژوهش از ۹ مدل ماسه‌ی مختلف با شکل ذرات و اندازه‌ی دانه‌های متفاوت و هم‌چنین دانه‌بندی گوناگون به‌منظور بررسی رفتار وابسته به زمان ماسه‌های خشک تحت تنش ثابت، استفاده شده‌است (جدول ۱). این ماسه‌ها عبارتند از ماسه‌های اتاوا (Ottawa Sand)، بابلسر (Babolsar Sand)، بوشهر (Bushehr Sand)، فیرزکوه شماره‌ی ۱٦۱ و ۱۷۱ (FiroozKooh Sand) و ماسه‌های

محلی شهر کرمانشاه (KRSS). منحنی دانه‌بندی ماسه‌ها در شکل (۱) نشان داده شده‌است. لازم به ذکر است که چهار نوع ماسه‌ای که در این منحنی نمایش داده نشدند عبارتند از (KRSS#1, KRSS#2, KRSS#3, KRSS#4). همگی این چهار ماسه دارای دانه‌بندی یکنواخت و مشخصی بودند، به‌طوری‌که ماسه‌های KRSS#1 و KRSS#2، عبوری از الک شماره‌ی ٤ و مانده روی الک شماره‌ی ١٠ هستند و ماسه‌های KRSS#3 و KRSS#4 نیز عبوری از الک شماره‌ی ١٠ و مانده روی الک شماره‌ی ٦٠ هستند. لازم به ذکر است که ماسه‌های KRSS#1 و KRSS#3 از یک جنس‌اند و ماسه‌های شماره‌ی KRSS#2 و KRSS#4 نیز از یک قرضه تهیه شده‌اند و تفاوت آنها در نوع دانه‌بندی‌شان است. هدف از این کار، تفکیک ماسه‌های یکسان به دو دسته‌ی درشت و ریز با شکل دانه‌های مختلف بوده‌است.

جدول ۱ مشخصات ماسه‌های استفاده شده

شکل ذرات [۲۸]	تخلخل کمینه	تخلخل بیشینه	چگالی ویژه	نام خاک (روش متحد)	D_{50}	ضریب انحنا	ضریب یکنواختی	نوع خاک
نیمه گرد گوشه	۰/۳۵۲	۰/۵٦۹	۲/٦٦۰	SP	۰/۹۷۱	۰/۹۹۰	۷/۲۳۱	Ottawa Sand
گرد گوشه	۰/۵۰۵	۰/۷۷۸	۲/۸۲۹	SP	۰/۱٦۹	۱/۰۱۰	۱/۹۳۵	Babolsar Sand
نیمه تیز گوشه	۰/۳۵۹	۰/۵۹۵	۲/٦۹٦	SP	۰/۱۹۷	۰/۹۰۹	۲/۸۷٦	Bushehr Sand
گرد گوشه	۰/۵۳۸	۰/۸۳۳	۲/٦٤٤	SP	۰/۲۳۰	۱/۰۷۲	۲/۰٦۵	FiroozKooh#161 Sand
گرد گوشه	۰/۵۱۷	۰/۸۲۵	۲/۵۹۲	SP	۰/۱۸٤	۱/۱۹۲	۱/۹۹۰	FiroozKooh#171 Sand
نیمه گرد گوشه	۰/۵۳۸	۰/۷۵٦	۲/۷۲۰	SP	–	-	-	KRSS#1
نیمه تیز گوشه	۰/۵۹۰	۰/۸۸۹	۲/۷٤۷	SP	–	-	-	KRSS#2
نیمه گرد گوشه	۰/٤٤٦	۰/٦٦۹	۲/٦۱٤	SP	–	-	-	KRSS#3
نیمه تیز گوشه	۰/۵۸۱	۰/۸٦۵	۲/۷۱۱	SP	–	-	-	KRSS#4



شکل ۱ منحنی دانه‌بندی ماسه‌های مورد استفاده

در شکل (۲) دستگاه ادئومتری نشان داده شده‌است. همه‌ی نمونه‌ها به‌صورت بازسازی‌شده در حلقه‌ی تحکیم به قطر ۷ سانتی‌متر و ارتفاع ۲ سانتی‌متر ساخته شدند و پس از اعمال تنش، در بازه‌های زمانی مشخص مورد ارزیابی خزش قرار گرفتند. در ابتدا آزمایش‌های کلاسیک ادئومتری، با گام‌های افزایش تنش در بازه‌ی زمانی ٤٨ ساعت، روی ماسه‌ی اتاوا در نسبت تخلخل‌های کمینه، بیشینه و نسبت تخلخل معادل با تراکم ٪٦٠ انجام شد. هر نمونه به‌مدت ٤٨ ساعت تحت هر تنش قرار می‌گرفت و سپس گام بعدی تنش به آن اعمال می‌شد، به‌طوری‌که هر نمونه تحت ٦ تنش متفاوت (با گام افزایش ۲ برابر) در مجموع ۱۲ روز تحت آزمایش بوده‌است. هم‌چنین در بخشی دیگر، افزایش تنش در بازه‌های زمانی ۷ روزه (با گام‌های افزایشی دو برابر و مجموعا ۳۵ روز) نیز مورد بررسی قرار گرفت. هدف آن است تا مناسب‌ترین تنش برای بررسی رفتار خزش ماسه‌ها در زمان ۳۰ روز به‌دست آید.



شکل ۲ دستگاه ادئومتر

در گام بعدی، به‌منظور مقایسه‌ی عملکرد ماسه‌ها در تراکم نسبی متوسط، از تراکم ٦٠ درصد برای نمونه‌ها استفاده شده‌است. علت انتخاب این مقدار، نزدیکی این عدد به شرایط بسترهای طبیعی بوده‌است. این موضوع توسط محققان دیگر نیز بیان شده‌است و آنان نیز از این تراکم نسبی در پژوهش خود استفاده کرده‌اند [31–28]. در جدول (۲) مشخصات نمونه‌های ساخته‌شده در آزمایش ادئومتر نشان داده شده‌است. هر مدل ماسه‌ی خشک به‌مدت ۳۰ روز تحت تنش ثابت ٤٥ کیلوپاسکال قرار گرفت تا رفتار زمان‌مند آن مورد ارزیابی قرار گیرد. علت انتخاب این سربار آن است که فرایند وقوع خزش در زمان ۳۰ روز با شفافیت بیشتری قابل ارزیابی است. درواقع رفتار ذرات ماسه که در تماس با یکدیگرند، بررسی شده‌است. به‌همین دلیل ماسه‌ی خشک به‌عنوان هدف اصلی انتخاب شده‌است تا واکنش طولانی‌مدت ذرات ماسه تحت تنش ثابت براساس شکل، اندازه و دانه‌بندی‌شان مورد بررسی قرار گیرد به‌طوری‌که روابط پیشنهادی، صرفا به‌شکل ذرات و تنش اعمالی وابسته باشد.

جدول ۲ مشخصات ماسه‌ها در آزمایش ادئومتر

وزن نمونه (gr)	پوکی	نسبت تخلخل	تراکم نسبی	نوع خاک
١٦٠/٢٥	٠/٣٠٥	٠/٤٣٨٨	٪٦٠	Ottawa Sand
١٥١/٩٣	٠/٣٨٠	٠/٦١٤٠	٪٦٠	Babolsar Sand
١٦٠/٨٠	٠/٣١٢	٠/٤٥٣٤	٪٦٠	Bushehr Sand
١٣٥/١١	٠/٤١٠	٠/٦٩٥٠	٪٦٠	FiroozKooh#161 Sand
١٣٧/٠٠	٠/٣٩٠	٠/٦٤٠٢	٪٦٠	FiroozKooh#171 Sand
١٤٥/٠٧	٠/٣٨٥	٠/٦٢٥٢	٪٦٠	KRSS#1
١٣٨/٩٨	٠/٤١٥	٠/٧٠٩٦	٪٦٠	KRSS#2
١٤٧/٥٩	٠/٣٤٩	٠/٥٣٥٢	٪٦٠	KRSS#3
١٤٠/٥١	٠/٤١٠	٠/٦٩٤٦	٪٦٠	KRSS#4

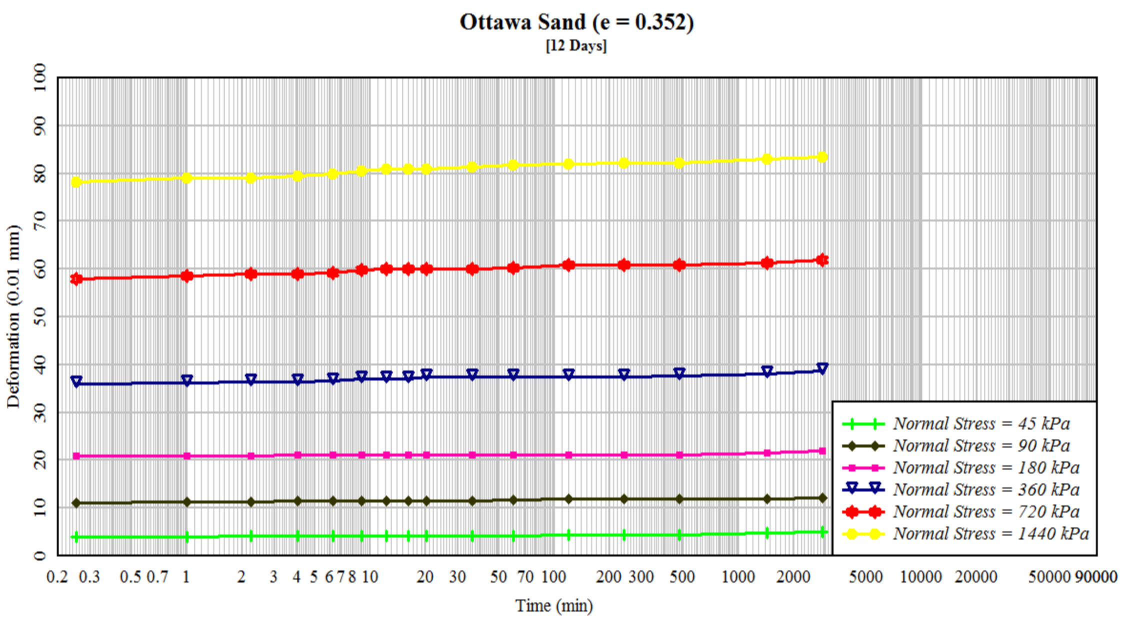
آزمایش‌های ادئومتری

آزمایش‌های ۲ روزه

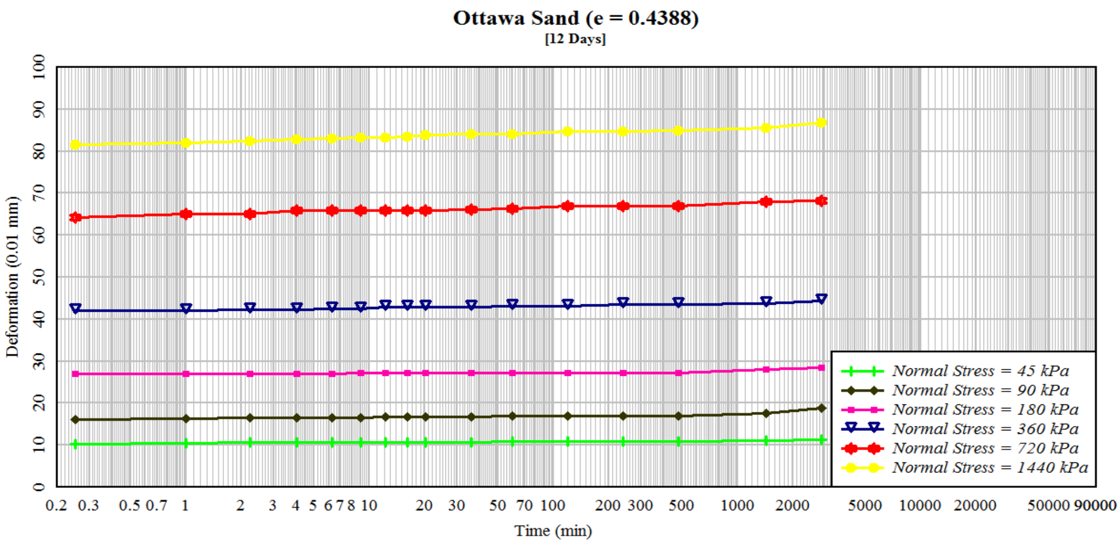
فرایند آزمایش همانند آزمایش تحکیم است، با این تفاوت که نمونه‌ها به‌صورت بازسازی‌شده ساخته می‌شوند و مطالعات در شرایط خشک انجام می‌شود. در

ابتدا قسمت‌های داخلی حلقه‌ی تحکیم به‌خوبی به گریس آغشته می‌شود تا اصطکاک دانه‌های ماسه با جداره‌ی حلقه به حداقل ممکن برسد و سپس براساس جدول (۲) هر نمونه به‌روش بارش خشک ساخته شد. نحوه‌ی ساخت نمونه‌ها بدین صورت بوده‌است که ماسه از درون یک قیف و بدون ارتفاع سقوط به داخل قالب تحکیم ریخته شد و به‌آرامی و بدون ارتعاش، قیف درراستای قائم بالا آورده شد تا تمامی ماسه داخل قالب را پر کند [32]. در مرحله‌ی اول نمونه‌های ماسه‌ی اتاوا در سه نسبت تخلخل اولیه (نسبت تخلخل کمینه، بیشینه و معادل تراکم ٦٠٪) مورد آزمایش قرار گرفتند تا مناسب‌ترین تنش سربار برای آزمایش‌های ٣٠ روزه‌ی خزش تعیین شود. در ابتدا، نمونه تحت تنش ٤٥ کیلوپاسکال و به‌مدت ٤٨ ساعت قرار می‌گرفت و در انتهای زمان، گام بعدی تنش (دو برابر حالت قبل) به نمونه اعمال می‌شد. هر نمونه ١٢ روز مورد آزمایش قرار گرفت. سه نسبت تخلخل انتخاب‌شده مجموعا ٣٦ روز در آزمایش ادئومتری مورد ازیابی قرار گرفتند. شکل‌های (٣) تا (٥) نتایج آزمایش‌ها روی نمونه‌های ماسه‌ی اتاوا را با نسبت تخلخل ٠/٣٥٢، ٠/٤٣٨٨ و ٠/٥٦٩ نشان می‌دهد.

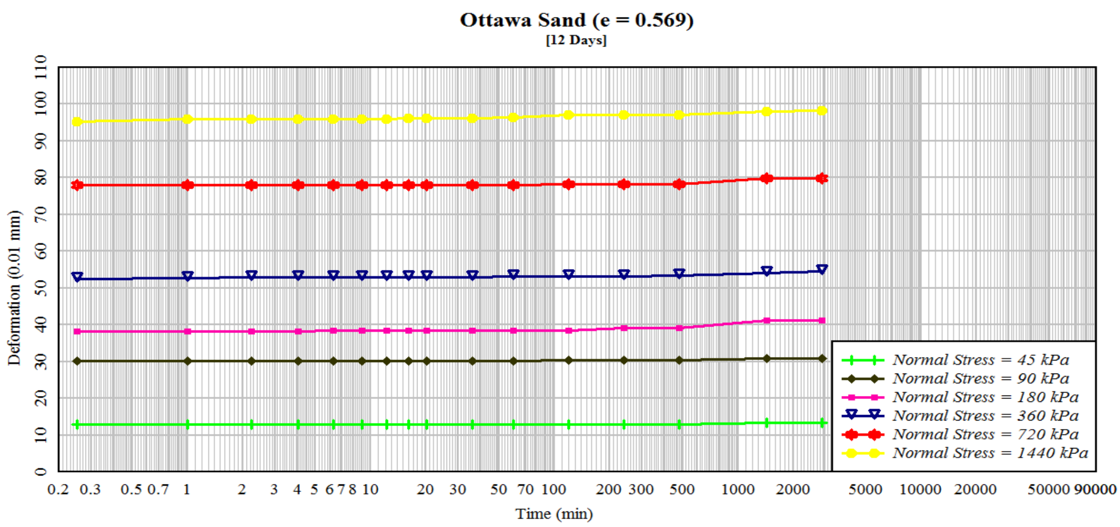
همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش نسبت تخلخل، میزان تغییرشکل‌های وابسته به زمان نیز بیشتر می‌شود که ٠/٨٣٥ میلی‌متر برای نمونه‌ی با نسبت تخلخل کمینه، ٠/٨٦٨ میلی‌متر برای نمونه‌ی با نسبت تخلخل معادل تراکم ٦٠٪ و ٠/٩٨٢ میلی‌متر برای نمونه‌ی با نسبت تخلخل بیشینه در انتهای آزمایش است. همان‌طور که در شکل‌های (٢) تا (٥) مشخص است، کمترین تنش سربار اعمال‌شده به نمونه‌ها (٤٥ کیلوپاسکال) رفتاری نزدیک به معادله‌ی خط دارد. بدین معنی که کمترین میزان تغییر شکل در مدت زمان ٤٨ ساعت برای این تنش مشاهده شده‌است. بر همین اساس این تنش به‌عنوان تنش ثابت در فرایند آزمایش‌های خزش ٣٠ روز انتخاب شد.



شکل ٣ نمودار تغییرشکل در برابر لگاریتم زمان برای ماسه اتاوا با نسبت تخلخل کمینه



شکل ٤ نمودار تغییرشکل در برابر لگاریتم زمان برای ماسه اتاوا با نسبت تخلخل معادل تراکم ٦٠٪

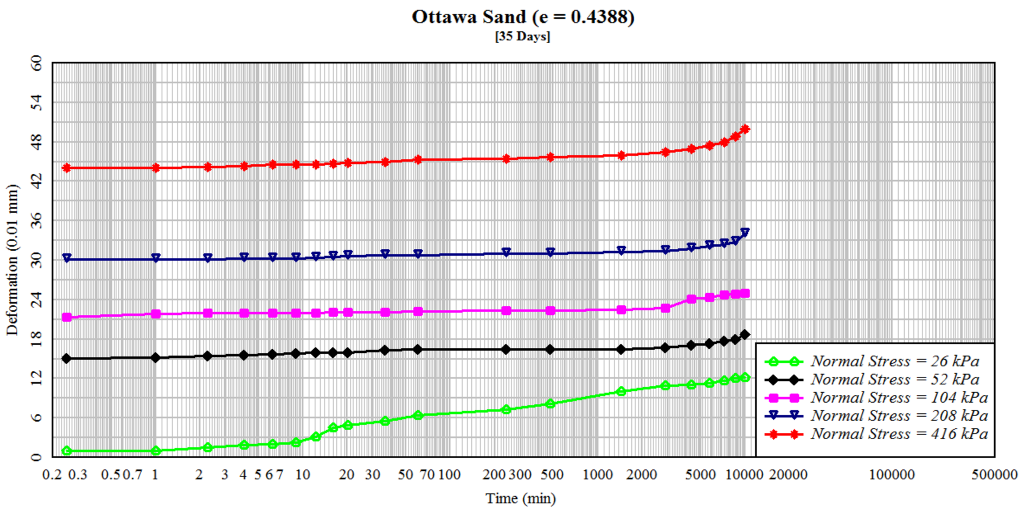


شکل ٥ نمودار تغییرشکل در برابر لگاریتم زمان برای ماسه اتاوا با نسبت تخلخل بیشینه

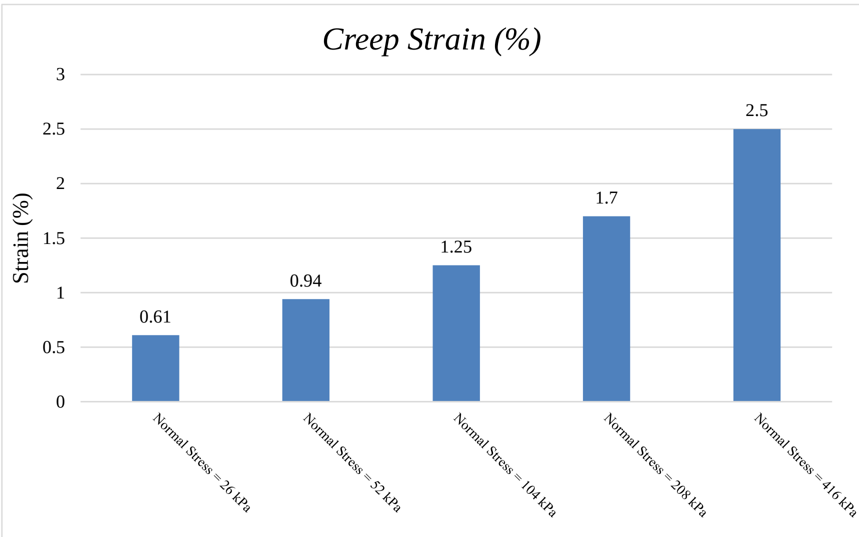
آزمایش‌های ۷ روزه

در این بخش یک‌سری آزمایش‌های تکمیلی به‌منظور درک بهتر رفتار ماسه‌ی اتاوا در حالت خشک در بارگذاری‌های مختلف و در بازه‌های زمانی متفاوت انجام گرفت که در ادامه به تشریح آنها پرداخته می‌شود. به‌منظور درک بهتر رفتار در شرایط آزمایش‌های ۳۰ روز (بند ۳-۳)، تمامی آزمایش‌ها در این قسمت در شرایط تراکم ٦٠٪ انجام شده‌اند. در این سری از آزمایش‌ها هر گام بارگذاری روی ماسه‌ی اتاوا در مدت زمان ۷ روز ثابت نگه داشته شده‌است و سپس گام بعدی اعمال بار انجام پذیرفته‌است. نمونه‌ی ماسه اتاوا با تراکم ٦٠٪ و جمعا ۳۵ روز تحت بارگذاری (۵ مرحله‌ی ۷روزه) قرار گرفته‌است. گام‌های اعمال بار در هر مرحله دو برابر قبل بوده‌است. در شکل (٦) نمودار این آزمایش‌ها نشان داده شده‌است. همان‌طور که در شکل (٦) مشاهده می‌گردد، در زمان شروع اعمال بار، جهش در نمودار مشهودتر است، هرچند که مقدار نمودار از صفر به دوازده صدم میلی‌متر رسیده‌است. رفته‌رفته با افزایش تنش سربار در

انتهای ۷ روز، سیر صعودی در انتهای یک روز تقریبا نرخ ثابتی دارد. درحالی‌که از انتهای ٢٤ ساعت تا پایان هفت روز، میزان افزایش تغییر مکان‌ها چشمگیرتر خواهد بود. قابل توجه است که نمودار با تنش سربار قائم ٤١٦ کیلوپاسکال در این بازه‌ی ۷روزه بیشتر دست‌خوش تغییرات خواهد شد، که همین نشان‌دهنده‌ی اهمیت توجه به زمان و خزش در ماسه‌های خشک است. اطلاعات حاصل از این بخش و بند پیشین (بند ۳-۱)، ملاک انتخاب نسبت تخلخل، میزان تراکم نسبی، زمان بارگذاری خزشی و مقدار تنش سربار اعمالی برروی نمونه‌ها بوده‌است. در شکل (۷) نمودار کرنش‌های خزشی ایجادشده در انتهای بازه‌های زمانی ۷روزه برای ماسه‌ی اتاوا نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشخص است، کرنش‌های خزشی یک رفتار افزایشی مشابه در این بازه‌ی زمانی را از خود نشان می‌دهند. این موضوع نشان‌دهنده‌ی اهمیت نقش زمان، علاوه‌بر میزان تنش اعمال‌شده به خاک است.



شکل ٦ نمودار تغییرشکل در برابر لگاریتم زمان برای ماسه اتاوا در تراکم ٦٠٪ در تنش‌های متفاوت و در گام‌های زمانی ۷ روز

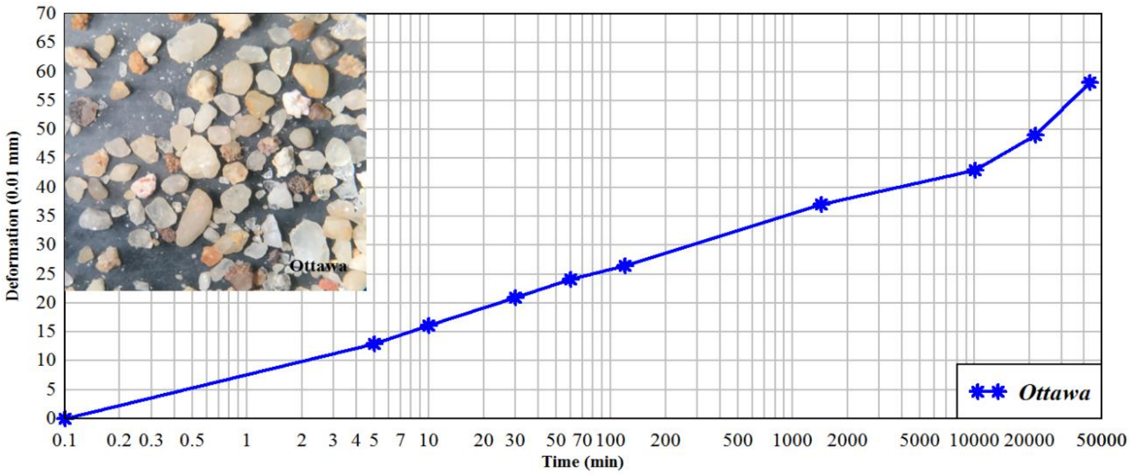


شکل ۷ نمودار کرنش خزشی برای نمونه‌ها در انتهای آزمایش‌های ۷ روزه

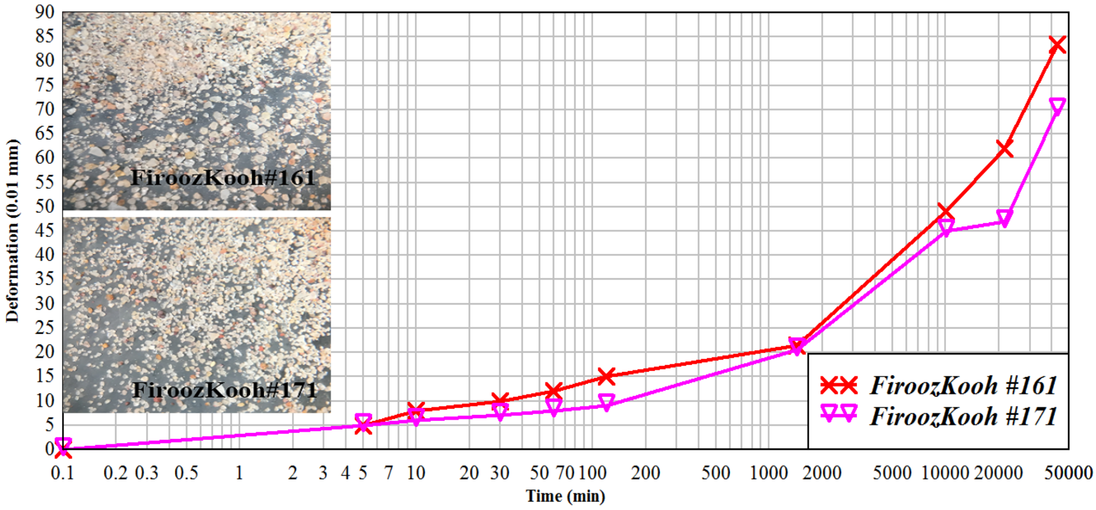
آزمایش‌های ۳۰ روزه

در این مرحله، ۹ مدل ماسه‌ی تعریف‌شده در قسمت‌های قبلی با تراکم نسبی ٦٠٪ و با همان فرایند اشاره‌شده در بخش ۳-۱ساخته شدند و تنش ثابت ٤٥ کیلوپاسکال به‌عنوان تنش سربار به نمونه‌ها اعمال شد و تا مدت زمان ۳۰ روز میزان تغییرشکل محوری نمونه‌ها ثبت گردید. شکل‌های (۸) تا (۱۲) نتایج مطالعات روی رفتار خزشی ماسه‌های خشک به‌همراه تصاویر ذرات هر کدام زیر میکروسکوپ نوری را به‌مدت ۳۰ روز (٤۳۲۰۰ دقیقه) نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، نمونه‌های KRSS#1 و KRSS#3 دارای ذراتی هستند که نسبتا ماهیتی گرد گوشه دارند و نمونه‌های KRSS#2 و KRSS#4 نیز دارای ذراتی نسبتا تیزگوشه هستند. نمونه‌های KRSS#1 و KRSS#2 دارای یک دانه‌بندی و نمونه‌های KRSS#3 و KRSS#4 هم دارای یک دانه‌بندی هستند. علت تغییرشکل بیشتر ماسه‌ی فیروزکوه ١٦١ نسبت‌به ١٧١ را می‌توان به ماهیت دانه‌بندی‌شان نسبت داد. ماسه‌ی ١٦١ دارای دانه‌بندی متوسط است، درحالی‌که ماسه‌ی ١٧١ ریزدانه محسوب می‌شود (مطابق استاندارد BS (BS ISO14688-1:2002)). علت تغییرشکل‌های بیشتر خزشی نیز همین اندازه ذرات است. از آنجایی که ماسه‌ی ١٦١ دارای ذرات درشت‌تری نسبت به ماسه‌ی ١٧١ است، لغزش دانه‌ها روی یکدیگر و بازآرایش ذرات در این نوع ماسه بیشتر به‌وقوع پیوسته‌است. لازم به ذکر است این دو ماسه عینا شرایط یکسانی دارند و تفاوت تنها در اندازه‌ی ذراتشان است. علت شیب تند تغییرشکل ماسه‌ی بوشهر نسبت‌به ماسه‌ی بابلسر پس از زمان ۲۰۰۰۰ دقیقه به اندازه‌ی دانه‌ها برمی‌گردد. از نظر دانه‌بندی، هم ماسه‌های بابلسر و هم بوشهر ریزدانه به‌شمار می‌روند، اما مطابق استاندارد BS ماسه‌ی بابلسر دارای ذرات ریزتری نسبت‌به ماسه‌ی بوشهر محسوب می‌شود. بنابراین ماسه‌ای که ذرات آن ریزتر است، لغزش و چرخش کمتری را در حین فرایند خزش تجربه کرده‌است.

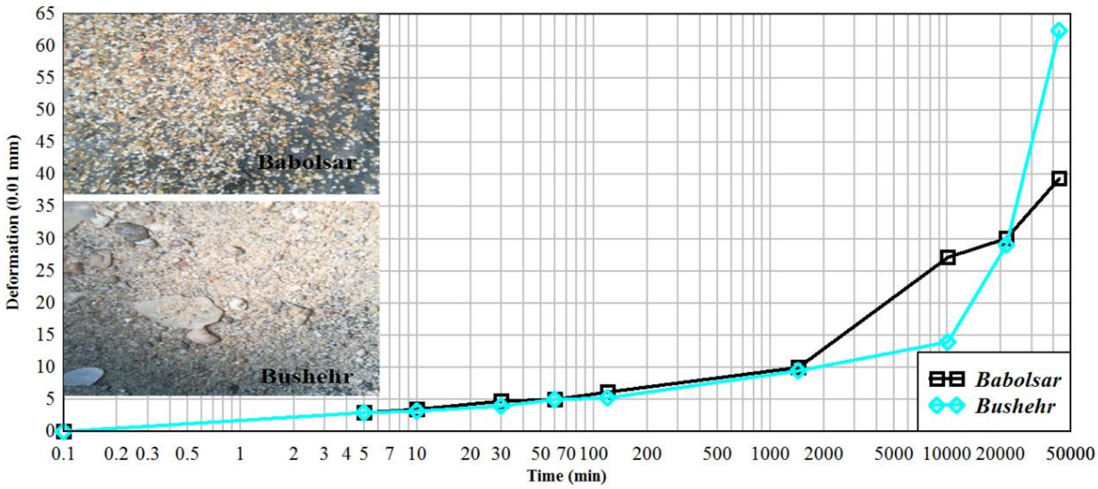
همان‌طور که در شکل‌های (۸) تا (۱۲) مشاهده می‌شود، تمامی نمونه‌ها با گذشت زمان، خزش را تجربه می‌کنند. تغییرات تغییرشکل وابسته به زمان ماسه‌ی اتاوا منظم‌تر است درحالی‌که در سایر نمونه‌ها و در ابتدای آزمایش روند افزایش تغییر شکل‌ها کند بوده و با رسیدن به انتهای آزمایش جهش می‌یابند. قابل ذکر است که افزایش تغییرشکل‌ها در نمونه‌های با ذرات درشت‌تر بیشتر از نمونه‌های با ذرات ریزتر است. مثلا برای ماسه‌های فیروزکوه ١٦١ و ١٧١ که در آن‌ها ماسه‌ی شماره‌ی ١٧١ ریزتر از ١٦١ است. هم‌چنین ذراتی که درصد تیز گوشه‌ی بیشتری دارند نیز دارای تغییرشکل‌های بیشتری هستند (مانند ماسه‌های KRSS#2 و KRSS#4).



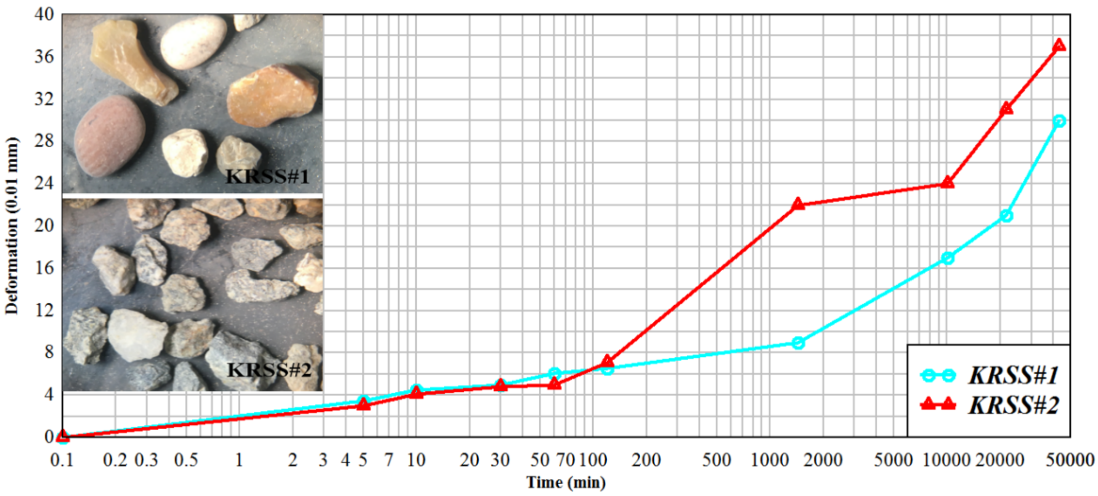
شکل ۸ نمودار تغییرشکل در برابر لگاریتم زمان برای ماسه اتاوا پس از گذشت ۳۰ روز تحت تنش ٤٥ کیلوپاسکال



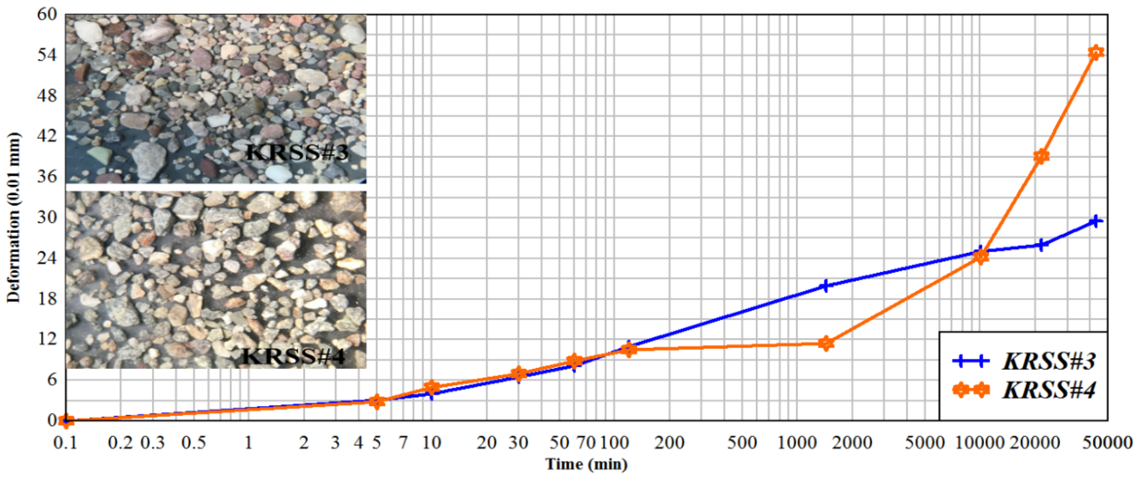
شکل ۹ نمودار تغییرشکل در برابر لگاریتم زمان برای ماسه‌های فیروز کوه پس از گذشت ۳۰ روز تحت تنش ٤٥ کیلوپاسکال



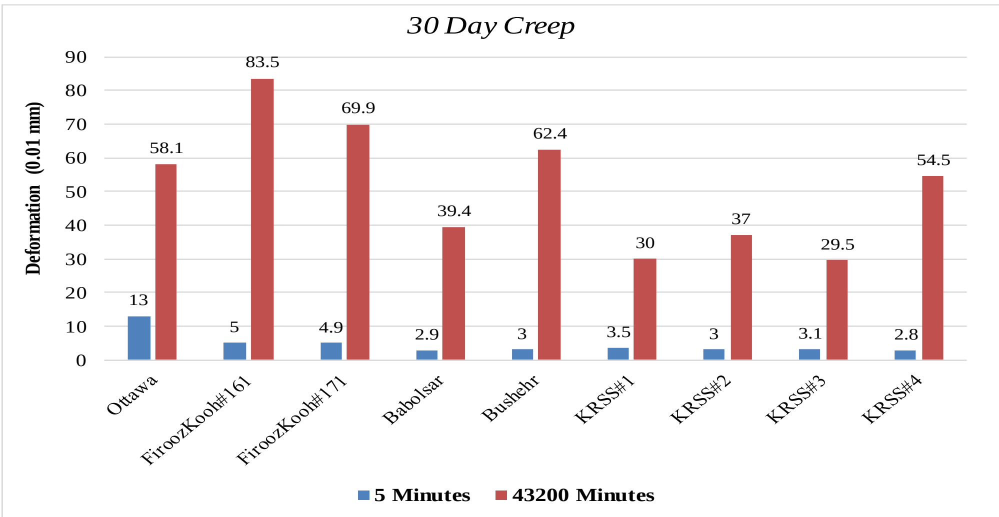
شکل ۱۰ نمودار تغییرشکل در برابر لگاریتم زمان برای ماسه‌های بابلسر و بوشهر پس از گذشت ۳۰ روز تحت تنش ٤٥ کیلوپاسکال



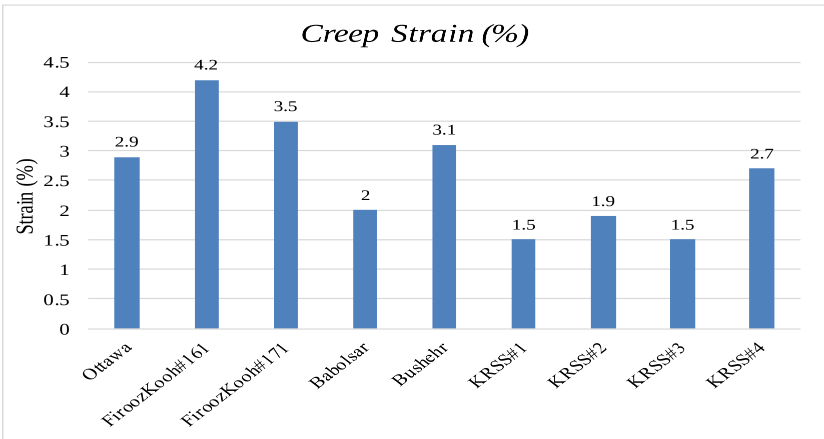
شکل ۱۱ نمودار تغییرشکل در برابر لگاریتم زمان برای ماسه‌های محلی شماره ۱ و ۲ کرمانشاه پس از گذشت ۳۰ روز تحت تنش ٤٥ کیلوپاسکال



شکل ۱۲ نمودار تغییرشکل در برابر لگاریتم زمان برای ماسه‌های محلی شماره ۳ و ٤ کرمانشاه پس از گذشت ۳۰ روز تحت تنش ٤٥ کیلوپاسکال



شکل ۱۳ نمودار مقایسه‌ی تغییر شکل ماسه‌ها در ابتدا و انتهای آزمایش



شکل ١٤ نمودار کرنش خزشی برای نمونه‌ها در انتهای آزمایش‌های ۳۰ روزه

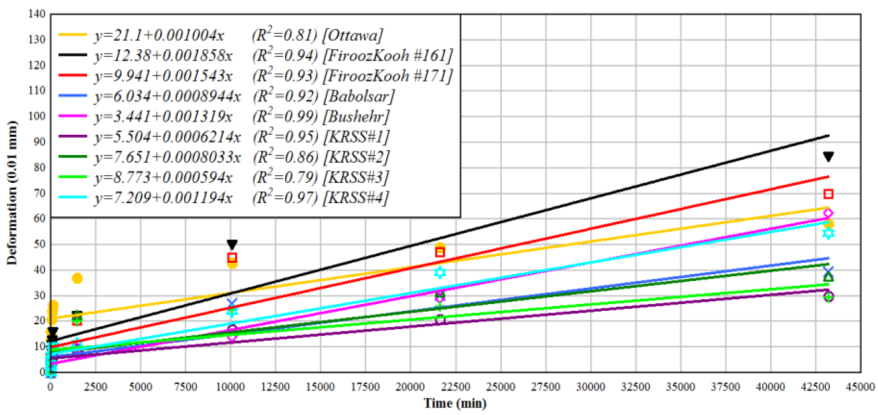
تغییر شکل و خزش در نمونه‌ها

در شکل (۱۳) نمودار تغییرشکل نمونه‌ها در شروع آزمایش و پس از پایان ۳۰ روز به تفکیک هر نوع ماسه نشان داده شده‌است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، ماسه‌ی فیروزکوه ۱٦۱ متحمل بیشترین تغییرشکل در فرایند آزمایش شده‌است. هم‌چنین ماسه‌های محلی شماره‌ی ۱ و ۳ کرمانشاه نیز کمترین تغییر شکل را تجربه کرده‌اند. علت این مسئله آن است که این دو نوع ماسه از یک جنس هستند اما دارای دانه‌بندی متفاوتی‌اند. ماسه‌ی محلی شماره‌ی ۱ دارای دانه‌بندی درشت‌تری نسبت‌به ماسه‌ی محلی شماره‌ی ۳ هست. ماسه‌های شماره‌ی ۱ و ۲ از الک شماره‌ی ٤ عبور کرده و روی الک شماره‌ی ۱۰ مانده‌اند؛ درحالی‌که ماسه‌های شماره‌ی ۳ و ٤ از الک شماره‌ی ۱۰ عبور کرده و روی الک شماره‌ی ٦۰ مانده‌اند. باتوجه به شکل (۱۳) تغییر شکل‌های ماسه‌ی شماره‌ی ۱ کمی بیشتر از ماسه‌ی شماره‌ی ۳ است، که به ماهیت درشت‌تر بودن ذرات آن مربوط است. قابل ذکر است که این دو نوع ماسه طبیعتی گردگوشه دارند. بر همین اساس علت نزدیکی رفتار خزشی‌شان می‌تواند همین موضوع باشد.

در شکل (١٤) کرنش‌های خزشی به‌وجودآمده در انتهای آزمایش برای هر نمونه نشان داده شده‌است. ماسه‌ی شماره‌ی ۱٦۱ فیروزکوه با ٤/۲ درصد خزش و ماسه‌های محلی شماره‌ی ۱ و ۳ کرمانشاه با ۱/۵ درصد خزش به‌ترتیب بیشترین و کمترین نرخ خزش در زمان ۳۰ روز را به خود اختصاص دادند.

معادلات پیشنهادی برای رفتار خزشی ماسه‌های خشک

در شکل (۱۵) معادلات پیشنهادی درجه‌ی یک برای پیش‌بینی وضعیت تغییرشکل‌های وابسته به زمان برای انواع ماسه‌های آزمایش‌شده (در بازه‌ی زمانی ۳۰ روز) نشان داده شده‌است. علت انتخاب زمان ۳۰ روز برای این قسمت، اهمیت بازه‌ی زمانی طولانی‌مدت برای تعیین رفتار خزشی بوده‌است. ضرایب هم‌بستگی (R^2) برای هر نمونه در شکل آورده شده‌است. هر اندازه که مقدار این پارامتر به عدد یک نزدیک‌تر باشد، معادله‌ی خط پیشنهادی از دقت بیشتری برخوردار است و برعکس، مقدار کمتر این پارامتر نشان از دقت پایین رابطه دارد. همان‌طور که مشخص است، ماسه‌ی بوشهر با ضریب هم‌بستگی ۰/۹۹ بهترین معادله است که دارای دقت پیش‌بینی بسیار خوبی است و ماسه‌ی محلی شماره‌ی ۳ کرمانشاه با کمترین مقدار (ضریب هم‌بستگی ۰/۷۹) ضعیف‌ترین معادله‌ی پیشنهادی است. به‌کمک روابط پیشنهادی می‌توان رفتار خزشی ماسه‌های مورد مطالعه را به‌خوبی ارزیابی کرد. لازم به ذکر است در این روابط، پارامتر x زمان برحسب دقیقه است، که با جایگزینی مدت زمان مورد نظر می‌توان تغییر شکل y را برای ماسه‌های خشک تعیین کرد.



شکل ۱۵ معادلات پیشنهادی برای تغییر شکل‌های خزشی به مدت ۳۰ روز و تحت تنش ثابت ٤۵ کیلوپاسکال

بحث و بررسی

در این بخش به بحث و بررسی پیرامون نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده در مدت زمان ۳۰ روز روی نمونه‌های ماسه‌ای خشک پرداخته می‌شود. از آن‌جایی که ماسه‌ها عمدتا پس از گذشت حداکثر ۵ دقیقه، نشست آنی خود را به اتمام می‌رسانند، ٤٣٢٠٠ دقیقه (۳۰ روز) مدت زمان طولانی و مناسبی برای بررسی رفتار وابسته به زمان برای این خاک‌ها محسوب می‌شود. همان‌گونه که در بخش‌های پیشین اشاره شد، مطابق جدول (۲) در می‌یابیم که کمترین نسبت تخلخل متعلق به ماسه‌ی اتاوا بوده و KRSS#2 نیز بیشترین نسبت تخلخل را به‌خود اختصاص داده‌است. ماسه‌ی اتاوا برخلاف دیگر نمونه‌ها، یک روند افزایش تغییرشکل وابسته به زمان منظم‌تری دارد و از یک الگوی نسبتا مشخص پیروی می‌کند. علت این موضوع هم به نوع دانه‌بندی آن برمی‌گردد که تمامی ذرات درشت، ریز و متوسط را در خود جای داده‌است. مقایسه‌ی بین ماسه‌های ١٦١ و ١٧١ فیروزکوه نشان می‌دهد که شماره‌ی ١٦١ دارای دانه‌های درشت‌تری نسبت به ١٧١ است.

مطابق شکل (٤)، ماسه‌ی ١٦١ تغییرشکل‌های بیشتری را از خود نشان می‌دهد (حدودا ۱۹ درصد کرنش خزشی بیشتر). تنها علت آن هم تفاوت در اندازه‌ی ذراتشان است. این دو ماسه از یک جنس، کانی و مشخصات ساختاری هستند و فقط در نوع دانه‌بندی‌شان اختلاف دارند (ماسه‌ی ۱۷۱ ریزدانه‌تر می‌باشد). هم‌چنین ماسه‌ی بابلسر که دارای ریزترین دانه‌بندی است، درمقایسه با ماسه‌ی ۱۷۱ فیروزکوه حدودا ۷۵ درصد خزش کمتری را تجربه کرده‌است. نکته جالب‌تر آن است که صرفا نوع دانه‌بندی ملاک جامعی برای این مسئله نیست و باید پارامترهای دیگری را نیز در خزش ماسه‌ها درنظر گرفت. نسبت تخلخل یکی از عوامل بسیار مؤثر در این زمینه است، اما به‌تنهایی کافی نیست. چرا که مطابق جدول (۲) مشاهده می‌شود که ماسه‌های فیروزکوه ١٦١ و KRSS#2 و KRSS#4 تقریبا دارای نسبت تخلخل مشابه هستند، اما رفتار خزشی آنها هیچ شباهتی به‌هم ندارد.

علت اصلی این موضوع نوع شکل ذرات و اندازه‌شان است، ماسه‌ی فیروزکوه ریزدانه است ولی دو ماسه‌ی دیگر دارای اندازه‌های درشت‌تری هستند. در این پژوهش ماسه‌های KRSS#1 و KRSS#2 باهم و ماسه‌های KRSS#3 و KRSS#4 باهم دارای یک نوع دانه‌بندی مشخص هستند. ماسه‌های محلی شماره‌ی ۱ و ۲ کرمانشاه از الک شماره‌ی ٤ عبور کردند و روی الک شماره‌ی ۱۰ باقی ماندند و ماسه‌های محلی شماره‌ی ۳ و ٤ کرمانشاه از الک شماره‌ی ۱۰ عبور کردند و روی الک شماره‌ی ٦٠ باقی ماندند.

در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) دیده می‌شود که ماسه‌های KRSS#2 و KRSS#4 دارای ذرات تیزگوشه‌تری نسبت‌به ماسه‌های KRSS#1 و KRSS#3 هستند. از مقایسه‌ی این دو شکل نمایان می‌شود که در شرایط یکسان از نظر دانه‌بندی، شکل ذرات عامل تعیین‌کننده‌ی رفتار خزشی ماسه‌های خشک است. ماسه‌ی KRSS#1 گردگوشه‌تر است، درحالی‌که ماسه‌ی KRSS#2 تیزگوشه‌تر می‌باشد و هر دو مدل ماسه دارای دانه‌بندی یکسان هستند. نتایج نشان می‌دهد که ماسه‌ی KRSS#2 حدود ۲۳ درصد خزش بیشتری را از خود نشان می‌دهد. چرا که به‌علت ماهیت تیزگوشه بودنش، نسبت تخلخل بیشتری داشته‌است. این وضعیت برای ماسه‌های KRSS#3 و KRSS#4 که دارای یک دانه‌بندی یکسان هستند نیز تکرار می‌شود. برای ماسه‌ی KRSS#4 با نسبت تخلخل بیشتر، کرنش‌های خزشی در حدود ۸۰ درصد بیشتر از ماسه‌ی KRSS#3 است. نکته‌ی قابل توجه این است که هرچند اختلاف نسبت تخلخل این ماسه‌ها در حدود ۲ برابر است (یعنی تفاضل بین نسبت تخلخل ماسه‌های KRSS#3 و KRSS#4 و مقایسه‌ی آن با تفاضل نسبت تخلخل بین ماسه‌های KRSS#1 و KRSS#2 دو برابر است)، اما اختلاف کرنش خزشی بین این گروه‌ها حدود ٤ برابر است. به‌عبارت ساده‌تر ماسه‌ی KRSS#4 با میزان تیزگوشه‌ی بیشتر، نسبت تخلخل بیشتر ولی با دانه‌بندی مشابه با KRSS#3، دارای ۸۰٪ کرنش‌های خزشی بیشتری است.

جدول ۳ مقایسه روابط پیشنهادی و روابط ارائه شده برای ماسه‌ها

رابطه مرجع [8] $\varepsilon_t = \varepsilon_{(t_0)} \left(\frac{t}{t_0}\right)^a (\%)$	در این تحقیق $\varepsilon_t(\%)$	میانگین	رابطه (۲)	رابطه (۱)	زمان (دقیقه)
۰/۵۲	۰/٤٦	۰/۰۹۱	۰/۰۸۱	۰/۱۰۱	۱۰۰
۰/٦۱	۰/۵۰	۰/۱۰	۰/۰۹۰	۰/۱۱۰	۱۰۰۰
۱/۰۳	۰/۹۵	۰/۱۹	۰/۱۸۰	۰/۲۰۰	۱۰۰۰۰

شکل ذرات در لغزش و بازآرایش مجدد دانه‌ها در زمان تجربه کردن خزش مهم‌ترین عامل در مقدار نهایی تغییرشکل‌های خزشی است. باتوجه به معادلات خطی نشان داده‌شده در شکل (۱۵)، روابط زیر به‌عنوان میانگین معادلات برای ماسه‌های با دانه‌های درشت (معادله‌ی ۱) و ماسه‌های با دانه‌های ریزتر (معادله‌ی ۲) پیشنهاد می‌گردد:

$$y = 10 + 0.001t \quad (۱)$$

$$y = 8 + 0.001t \quad (۲)$$

که t زمان برحسب دقیقه و y تغییرشکل ماسه برحسب صدم میلی‌متر است.

در جدول (۳) مقایسه‌ای بین نتایج روابط ارائه‌شده در این پژوهش و نتایج مرجع (۸) انجام شده‌است که نشان از دقت مناسب روابط ارائه‌شده در این مقاله است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش رفتار وابسته به زمان ماسه‌های خشک تحت بارهای مختلف و در زمان‌های متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت. ۹ نمونه‌ی مورد مطالعه مجموعا ۳۴۱ روز تحت آزمایش بودند (نمونه‌های ۲، ۷ و ۳۰ روزه). نتایج آزمایش‌های ادئومتری در شرایط خشک نشان داد که عامل خزش (تغییرشکل تحت تنش ثابت)، لغزش و بازآرایش مجدد دانه‌ها و در نهایت خردشدن ذرات است. عوامل مؤثری که در لغزش دانه‌ها روی هم نقش دارند عبارتند از شکل ذرات، نسبت تخلخل، اندازه‌ی دانه‌ها و نوع دانه‌بندی. قابل ذکر است که ترکیب پیچیده‌ای از تمامی عوامل ذکرشده، خزش در ماسه‌های خشک را ایجاد می‌کنند، که به‌سادگی قابل تفکیک نیستند و تمامی عوامل به‌هم وابسته‌اند. به‌جز ماسه‌های استاندارد که دارای محدوده‌ی وسیع ذرات در توده‌ی خاک هستند، سایر نمونه‌ها به‌صورت غیرمنظم افزایش تغییرشکل‌های وابسته‌به زمان را از خود نشان می‌دهند. بر همین اساس پیش‌بینی الگوی خزش ماسه‌های استاندارد نسبتا ساده‌تر است، اما این مسأله برای ماسه‌های بد دانه‌بندی‌شده (اعم از نمونه‌های دارای ذرات ریز یا درشت) به‌راحتی قابل شناسایی نیست. در خاک‌های بد دانه‌بندی‌شده، هر نمونه باتوجه به ویژگی‌های ساختاری خود (تیز یا گردگوشه بودن دانه‌هایش و ریز یا درشت بودن ذراتش) رفتاری منحصر به‌فرد از خود نشان می‌دهد. مقایسه‌ی شکل ذرات (تیز یا گردگوشه بودن) نشان می‌دهد که در شرایط یکسان از نظر دانه‌بندی، ماسه‌های تیزگوشه خزش بیشتری از خود نشان می‌دهند که می‌توان آن را به شکستگی ذرات تیز در طی خزش نسبت داد. کمترین نرخ کرنش متعلق به ماسه‌ی با دانه‌های درشت و از نوع نسبتا گردگوشه است (KRSS#1)، درحالی‌که الزاما دارای بیشترین نسبت تخلخل نیست. این موضوع اهمیت شکل دانه‌ها و اثرشان روی لغزش و چرخش دانه‌ها روی هم را نشان می‌دهد.

۱. ماسه‌های تیزگوشه‌تر خزش بیشتری را نسبت‌به گردگوشه‌ها از خود نشان می‌دهند (KRSS#2 و KRSS#4 درمقایسه با KRSS#1 و KRSS#3). هم‌چنین ذرات تیزگوشه‌تری که از نظر اندازه‌ی دانه‌ها ریزتر باشند (KRSS#4) در مقایسه با همین شرایط اما با اندازه‌ی ذرات درشت‌تر (KRSS#2) خزش بیشتری را از خود نشان می‌دهند (حدود ٤۲٪ بیشتر).

۲. مقایسه‌ی ماسه‌های فیروزکوه که هر دو از یک جنس و ساختار هستند و تنها تفاوت در اندازه‌ی دانه‌هایشان است، نشان می‌دهد که ماسه‌ی با ذرات درشت‌تر یعنی شماره‌ی ۱٦۱، خزش بیشتری نسبت‌به شماره‌ی ۱۷۱ خواهد داشت. این نتایج، وابستگی اندازه‌ی ذارت و شکل دانه‌ها را در مقدار لغزش و چرخش ماسه‌ها روی هم نمایان می‌سازد.

۳. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که شکل ذرات و اندازه‌ی دانه‌ها مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار در رفتار وابسته‌به زمان ماسه‌های خشک هستند. به‌طوری‌که تیزگوشه بودن، منجر به افزایش خزش خواهد شد و ریزدانه‌تر بودن، به شرط تیزگوشه‌تر بودن نیز خزش را بیشتر خواهد کرد (تا ٤۲٪ کرنش خزشی بیشتر).

٤. در شرایطی که شکل ذرات یکسان باشد و تنها تفاوت در اندازه‌ی دانه‌ها باشد، توده‌ی با اندازه‌ی ذرات درشت‌تر کرنش‌های خزشی بیشتری را از خود نشان خواهد داد (تا ۲۰٪ کرنش خزشی بیشتر).

سپاس‌گزاری

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم تحقیقات و فناوری به‌شماره‌ی ۱٦۰۰ انجام شده‌است.

مراجع

1- Ausgustesen, A., Liingaard, M., and Lade, P.V., "Evaluation of Time-dependent Behavior of Soils", *International Journal of Geomechanics,* Vol. 4, No. 3, pp. 137-156, (2004).

2- Zhang, Y., Xue, Y.Q., Wu, J.C., and Shi, X.Q., "Creep Model of Saturated Sands in Oedometer Tests", *GeoShanghai International Conference, Geotechnical Special Publication,* June 6-8, pp. 1-8, (2006).

3- Murayama, S., Michihiro, K., and Sakagami, T., "Creep Characteristics of Sand", *Soil and Foundations,* Vol. 24, No. 2, pp. 1-15, (1984).

4- Murayama, S., "Formulation of Stress-strain-time Behaviors of Soils under Deviatoric Stress Condition", *Soil and Foundations,* Vol. 23, No. 2, pp. 43-57, (1983).

5- Lade, P.V., and Liu, C.T., "Experimental Study of Drained Creep Behavior of Sand", *Journal of Engineering Mechanics,* Vol. 124, No. 8, pp. 912-920, (1998).

6- Wang, Z., and Wong, R.C.K., "Strain-dependent Creep Behavior of Athabasca Oil Sand in Triaxial Compression", *International Journal of Geomechanics,* Vol. 17, No. 1, pp. 1-9, (2017).

7- Wang, F., Miao, L., and Lv, W., "Experimental Study of the Creep Behavior of the Yangtze River Sand", *GeoRlorida, Advances in Analysis, Modeling & Design, GSP 199,* pp. 777-782, (2010).

8- Nian, T., Yu, P., Diao, M., Lu, M., and Liu, C., "Shear-creep Behavior of Dredger Fill Silty Sands under Different Normal Pressure", *Proceedings of Civil Engineering and Urban Planning, CEUP 2012,* pp. 558-563, (2012).

9- Lade, P.V., "Creep Effects on Static and Cyclic Instability of Granular Soils", *Journal of Geotechnical Engineering,* Vol. 120, No. 2, pp. 404-419, (1994).

10- Yin, J., Soleimanbeigi, Al., Likos, W.J., and Edil, T.B., "Creep Behavior of Compacted Waste Foundry Sands for Use as Roadway Embankment Fill", *Journal of Geotechnical and*

Geoenvironmental Engineering, Vol. 144, No. 2, pp. 1-10, (2018).

11- Park, K.H., Jung, Y.H., and Chung, C.K., "Evolution of Stiffness Anisotropy During Creep of Engineered Silty Sand in South Korea", *KSCE Journal of Civil Engineering,* Vol. 21, No, 6, pp. 2168-2176, (2017).

12- Yang, Y., Lai, Y., and Chang, X., "Experimental and Theoretical Studies on the Creep Behavior of Warm Ice-rich Frozen Sand", *Gold Region Science and Technology,* Vol. 63, pp. 61-67, (2010).

13- Brzesowsky, R.H., Hangx, S.J.T., Brantut, N., and Spiers, C., "Compaction Creep of Sands due to Time-dependent Grain Failure: Effects of Chemical Environmental, Applied Stress, and Grain Size", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth,* Vol. 119, No. 10, pp. 7521- 7541, (2014).

14- Park, K.H, Chung, C.K., and Jung, Y.H., "State-dependent Volume Change During Creep in Engineered Silty Sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* Vol. 145, No. 6, pp. 1-10, (2019).

۱۵- نگهدار، علیر ضا، یادگاری، شیما، هو شمندی، سیاب، «برر سی رفتار خز شی خاک رس در شرایط آزمایشگاهی»، *نشریه مهندسی عمران فردوسی*، دوره ۲۸، شماره ۱، صص ۱-۱۲، (۱۳۹۵).

16- Lade, P.V., Liggio, C.D., and Nam, J., "Strain Rate, Creep and Stress Drop-creep Experiments on Crushed Coral Sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* Vol. 135, No. 7, pp. 941-953, (2009).

17- Kiyota, T., Tatsuoka, F., and Yamamuro, J., "Drained and Undrained Creep Characteristics of Loose Saturated Sand", *Proceedings of Site Characterization and Modeling, GSP 138,* (2005).

18- Sawicki, A., Miereczynski, J., and Swidzinski, W., "Apparent Creep of Saturated Sand Caused by Intrinsic Cyclic Loading", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* Vol. 140, No. 2, pp. 1-3, (2014).

19- Enomoto, T., Koseki, J., Tatsuoka, F., and Sato, T., "Creep Failure of Sands Exhibiting Various Viscosity Types and its Simulation", *Soils and Foundations,* Vol. 55, No. 6, pp. 1346-1363, (2015).

20- Lade, P.V., and Karimpour, H., "Stress Drop Effects in Time Dependent Behavior of Quartz Sand", *International Journal of Solids and Structures,* Vol. 87, No. 1, pp. 167-182, (2016).

21- Prisco, C., Imposimato, S., and Vardoulakis, I., "Mechanical Modeling of Drained Creep Triaxail Tests on Loose Sand", *Geotechnique,* Vol. 50, No. 1, pp. 73-82, (2000).

22- Zhu, Z., Luo, F., Zhang, Y., Zhang, D., and He, J., "A Creep Model for Frozen Sand of Qinghai-Tibet Based on Nishihara Model", *Cold Region Science and Technology,* Vol. 167, (2019).

23- Zhang, Z., and Wang, Y.H., "DEM Modeling of Aging or Creep in Sand Based on the Effects of Microfracturing of Asperities and Evolution of Microstructural Anisotropy during Triaxial Creep", *Acta Geotechnica,* Vol. 11, pp. 1303-1320, (2016).

24- Liu, S., Wang, J., and Kwok, C.Y., "DEM Simulation of Creep in One Dimensional Compression of Crushable Sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* Vol. 145, No. 10, pp. 1-10, (2019).

25- Tanaka, Y., and Tanimoto, K., "Time Dependent Deformation of Sand as Measured by Acoustic Emission", *In Proceedings International conference on rheology and soil mechanics,* Elsevier Science, London, pp. 182-193, (1988).

26- Mejia, C.A., Vaid, Y.P., and Negussey, D., "Time Dependent Behavior of Sand", *In Proceedings International conference on rheology and soil mechanics, Conventry, England.* (1988).

27- McDowell, G.R., "Micromechanics of Creep of Granular Materials", *Geotechnique*, Vol. 53, No. 10, pp. 915-916, (2003).

۲۸- حاجی‌عزیزی، محمد، ن صیری، م سعود، مظاهری، احمدر ضا، «برر سی رفتار ما سه‌های آلوده به نفت خام در آزمایش CBR»، *نشریه‌ی مهندسی عمران امیرکبیر*، دوره ۵۳، شماره ۷، صص ۱-۱۷، (۱٤۰۰).

29- Porcino, D., Caridi, G., Malara, M., and Morabito, E., "An Automated Control System for Undrained Monotonic and Cyclic Simple Shear Tests", *In Proceedings GeoCongress 2006*, (2006).

30- Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M.R., and Yazdani, H., "Geotechnical Properties of Gas Oil-contaminated Kaolinite", *Engineering Geology,* Vol. 166, pp. 11-16, (2013).

31- Porcino, D., Marciano V., and Granata, R., "Cyclic Liquefaction Behavior of a Moderately Cemented Grouted Sand under Repeated Loading", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* Vol. 79, pp. 36-46, (2015).

32- Monkul, M. M., Gultekin, C., Gulver, M., Akin, O., and Eseller-Bayat, E., "Estimation of Liquefaction Potential from Dry and Saturated Sandy Soils under Drained Constant Volume Cyclic Simple Shear Loading", *Soil Dynamic and Earthquake Foundation,* Vol. 75, pp. 27-36, (2015).